새로운 강상관물성 연구그룹

DOI: 10.3938/PhiT.26.003

김해리 · Marie Kratochvilova · Jonathan C. Leiner · 박제근

Emergent Phenomena Group

Haeri KIM, Marie KRATOCHVILOVA, Jonathan C. LEINER and Je-Geun PARK

At the Emergent Phenomena Group, we focus on studies of strongly correlated electron systems, such as transition-metal oxides and related materials, mostly in bulk form. The group consists of three teams: 'oxide materials team', 'magnetic van der Waals materials team', and 'scattering team'. Having these three teams working together allows our group to paint a complete picture of novel materials by studying their crystal and magnetic structures, their physical properties and their spin dynamics. We are generally interested in all areas of strongly correlated electron physics, but focus particularly on magnetic properties. We are currently conducting research into the following selected topics: multiferroic behavior, spin-orbital coupling in transition-metal oxides, and low-dimensional magnetism. For example, our group has been investigating some very interesting mul-

tiferroic materials like hexagonal manganites, $(Y,La)MnO_3$, and $BiFeO_3$. More recently, we have been concentrating on the issues of strong spin-lattice coupling and magnon-phonon interactions. Lastly, we have investigated low-dimensional magnetism in triangular and honeycomb lattices. Through this investigation of low-dimensional magnetic property, we are constantly searching for new magnetic van der Waals materials with interesting emergent phenomena.

들어가는 글

지금은 응집물질물리로 발전된 고체물리분야의 지난 백여 년의 역사를 살펴보면, 매 10-20년마다 이목을 끄는 새로운 연구주제가 대두되고, 일종의 대표주자 격으로 떠오르는 것을 쉽게 발견할 수 있다. 유행처럼 변화를 거듭해 온 이 분야 연구에는 늘 그 주제를 대표하는 새로운 물질이 있었고, 이런 신물질에 의한 새로운 연구주제의 발전이라는 연구 구조들은 지금도 바뀌지 않고 진행되고 있다(그림 1). 이런 응집물질물리학의 발전에 대한 인식에 입각하여, 강상관물성 연구그룹은 새로운 물질을 통한 강상관 물성의 새로운 분야 창출을 연구의 주된 목표로 하고 있다.

특히 본 연구그룹은 강상관 전자계의 벌크(bulk) 성질을 주로 연구하며 세 개의 팀(자성산화물팀, 자성반데르발스 물질팀, 중성자산란팀)으로 이루어져 있다. 세 팀은 새로운 물질의 합성에서 물성의 측정, 그리고 X선과 중성자를 이용한 산란실험을 통하여 강상관성에 대한 근본적인 이해를 하도록 구성되어 있다. 강상관성에서 발현하는 자성현상이 그룹의 주된 연구 대상이며, 현재 관심을 가지고 연구를 수행하고 있는 분야는 '다중강성 문제를 비롯한 자성체의 마그논-포논 결합', '스핀-궤도 결합', 그리고 '저차원 자성 현상' 등이다. '다중강성 문제'는 본 그룹이 지난 20여 년 동안 많은 가시적인 성과를 올린 연구 주제로서 특히 육방구조 망간산화물, $(Y,La)MnO_3$ 과 $BiFeO_3$ 물질에 집중하여 연구를 수행하고 있다. 최근에는 다중강성 물질을 연구하면서 발견한 강한 스핀-격자, 조금 더 구체적으로는

저자약력

김해리 박사는 이화여자대학교 이학박사(2014)로서 한국과학기술연구원(KIST) 연구원을 거쳐 현재 서울대학교 기초과학연구원 강상관계물질연구단 연구원으로 재직 중이다. (haeri@snu.ac.kr)

Marie Kratochvilova 박사는 Charles 대학교 이학박사(2015)로서 현재 서울대학교 기초과학연구원 강상관계물질연구단 연구원으로 재직 중이다. (kratm6bm@snu.ac.kr)

Jonathan C. Leiner 박사는 Notre Dame 대학교 이학박사(2012)로서 Oak Ridge 국립연구소 연구원을 거쳐 현재 서울대학교 기초과학연구원 강상관계물질연구단 연구원으로 재직 중이다. (jleiner@snu.ac.kr)

박제근 교수는 Imperial College 이학박사(1993)로서 프랑스 국립과학연구소(CNRS) 연구원과 런던대학교 연구원을 거쳤으며, 인하대학교와 성균관대학교에서 교수로 재직 후, 현재 서울대학교 물리학과 교수로 재직 중이며, 기초과학연구원 강상관계물질연구단 부단장을 겸하고 있다. (jgpark10@snu.ac.kr)

Fig. 1. Main research themes in the history of condensed matter physics over the past few decades and theoretical models developed alongside.

마그논-포논 결합에 초점을 맞추어서 연구를 진행하고 있다. 그리고 스핀-궤도 결합 주제는 주로 루테튬(Ru) 전이금속산화물을 중심으로 진행하고 있으며, 주된 관심사는 정밀 측정을 통해 물질의 구조와 스핀 동역학을 이해하는 것이다. 마지막으로 ‘저차원 자성현상’ 주제에 대해서는 삼각형 격자와 벌집격자 물질에 대해서 연구를 수행하고 있다. 이런 저차원 자성현상 연구의 주요 연구노력을 통하여 자성 반데르발스 물질이라는 새로운 물질을 발견하고, 이를 이용하여 새로운 물리현상을 탐색하고 있다.

새로운 자성 산화물 연구

1980년대부터 시작된 산화물 연구는 1980년대의 고온초전도체,^[1] 1990년대의 초거대자기저항 현상,^[2] 그리고 2000년대의 다중강성 연구^[3]로 이어지면서 강상관작용 전자계의 대표적인 물질군으로 자리잡고 있다. ‘자성산화물팀’에서는 본 강상관계물성그룹과 기초과학연구원 강상관계물질연구단 소속의 여러 그룹에서 관심을 갖는 다양한 자성 산화물에 초점을 맞추어 연구하고 있다. 이 팀의 목적은 새로운 자성 산화물 개발을 토대로 기존에 존재하는 물리현상과는 다른 현상을 발견하는 것이다. 이를 위하여 두 대의 floating zone furnace와 한 대의 고압 anvil furnace가 구비되어 있고, flux 방법과 vapour transport 방법을 통해 세계 최고 수준의 시료를 합성하고 있다.

본 그룹의 연구진들은 이미 여러 종류의 단결정 시료를 합성하는 전문적인 기술을 보유하고 있으며, X-선 및 중성자 회절 실험을 포함한 다양한 방법을 통해 자성을 예측하고 분석하고 있다(그림 2). 우리 그룹에는 넓은 온도범위(14–1500 K)

Fig. 2. (a) The single-crystal growth in the floating-zone furnace and the resulting ingot shown below. (b) The 3D grid of the crystal structure from the single-crystal x-ray diffraction measurement. (c) The ‘armchair-kagome’ network of the P3121 structure of $\text{Mn}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$.^[6]

에서 초정밀 구조분석을 할 수 있는 분말과 단결정 회절 장비가 구축되어 있다. 또한 우리는 중성자 회절 실험을 수행하기 위해서 전 세계에 위치한 대규모 중성자 산란연구시설들(하나로, 한국; J-PARC, 일본; ISIS 영국; PSI, 스위스; ILL, 프랑스)을 적극적으로 활용하고 있다.

‘자성산화물팀’에서는 광범위한 산화물에서 나타나는 다양한 물리적 특성 중에서도, 주로 결정구조로 인한 기하학적인 찢찢맴(geometrical frustration) 현상을 연구하고 있다. 예를 들면, 우리는 다중강성 물질 가운데 이차원 삼각격자의 반강자성 구조를 나타내는 $(\text{Y,Lu})\text{MnO}_3$ 물질을 가지고 많은 연구를 수행하고 있다. 또 우리가 최초로 단결정 시료를 합성하여 실험을 진행하고 있는 물질로는 양자 스핀($S=1/2$) $\text{Cu}(\text{Y,Lu})_2\text{Ge}_2\text{O}_8$ 계열의 화합물^[4]과 $\text{Mn}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$ 시스템^[5,6]이 있다. 우리는 고분해능 X선 회절 및 중성자 회절실험의 분석을 통해 $\text{Cu}(\text{Y,Lu})_2\text{Ge}_2\text{O}_8$ 의 구리 네트워크가 이차원 삼각 격자를 이루며 이 격자에 수직인 b축을 따라 약한 결합을 갖는 구조임을 알 수 있었다. 또한 연구진은 저온에서 자기모멘트가 정렬하는 측정 결과를 통해 외부자기장에 의해 유도되는 상전이 현상을 입증했다. 이를 통하여 우리는 새로운 양자 반강자성 물질과 현상을 보고할 수 있었다.

또한 우리는 새롭고 흥미로운 재료로 벌집 격자의 루테튬(Ru) 산화물에 많은 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다. 원자번호 44번을 갖는 루테튬은 4주기에 속하는 물질로 주기율

REFERENCES

- [1] J. G. Bernoz and K. A. Müller, Z. Phys. B **64**, 189 (1986).
- [2] S. Jin *et al.*, Science **15**, 5157 (1994).
- [3] N. Spaldin *et al.*, Physics Today **63**, 38 (2010).
- [4] H. Cho *et al.*, Phys. Rev. B (in press).
- [5] D. C. Peets *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 174431 (2016).
- [6] D. C. Peets *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 014424 (2017).

Fig. 3. (a) In-plane view of the crystal structure with $P2_1/m$ space group and (b) magnetization of Li_2RuO_3 samples with different doping.^[7]

표에서 철 원자 바로 아래에 위치한다. 루테튬이 속한 4주기 물질의 전자는 3주기 물질들에 비하여 원자번호가 높아 3주기 물질의 전자에 비하여 더 강한 스핀-궤도 결합을 한다. 이로 인해 루테튬 산화물 내의 전자 간 상호작용과 스핀-궤도 결합으로 나타나는 흥미로운 물리 현상들을 예측할 수 있다. 본 연구팀은 스핀-궤도 결합과 금속-절연체 전이를 갖는 $(\text{Li,Na})_2\text{RuO}_3$ 의 포괄적인 연구를 수행하고 있다. 그 중 그림 3에서 보여주고 있는 Li_2RuO_3 는 2차원의 벌집모양 격자가 Li층에 의하여 분리된 구조를 갖는 물질로, 결합 중 일부가 이합체화(dimerization)하여 주기적으로 배열된 원자가결합결정(Valence Bond Crystal) 상태를 갖는다. 해당 이합체화 결합의 단일항(singlet) 스핀 상태를 이용하면 양자적 얽힘 상태에 대한 연구를 통하여 양자적 얽힘이 물질 내에서 물성에 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대한 실험적인 연구까지 기대된다.

이외에도 ‘자성산화물팀’에서는 새로운 다중강성 물질인 $(\text{Ca,Sr})_3(\text{Mn,Ti})_2\text{O}_7$ Improper hybrid Perovskites에서도 흥미로운 성질들을 관찰하고 있다.^[8-10] 우리가 잘 알고 있는 proper 강유전성 물질의 경우 분극이 주로 물질 내 서로 다른 이온의 위치 변화와 관련되어 있는 반면, improper 강유전체 물질의 경우 격자 왜곡으로 분극이 일어나게 된다. 본 연구진의 최종 목표는 이론적으로 예측된 강유전체 상전이^[10]와 물질 내 새로운 삼선형 결합의 원리를 구조연구를 통하여 이해하는 것이다.

자성 반데르발스 물질 연구

2005년 그래핀이라는 2차원 물질이 발견되면서 명실공히 2차원 물질이라는 새로운 연구분야가 새롭게 시작되었다.^[11,12] 그리고 지난 10여 년 동안 silicene,^[13] phosphorene,^[14] 그리고 TMDC^[15] 등의 새로운 2차원 물질이 발견되면서 이 분야의 연구는 폭발적으로 늘어나고 있다. 이렇게 다양한 2차원 소재가 발견되고 있지만, 아직 이들 물질 가운데 명확한 자기적 성

Fig. 4. Schematic of how one can study the thickness dependence of the fundamental magnetic properties using the magnetic vdW materials such as the transition temperatures and the ground states.

질을 띠고 있는 물질은 없다. 물론 그래핀의 경우, 결함을 만들거나 또는 자성원소의 functional coupling을 이용해 자기적 성질을 띠게 하려는 노력이 있었다. 그렇지만 처음부터 자성원소로 이루어진 2차원 자성물질 연구는 아주 최근까지 거의 이루어지지 않고 있었다. 하지만 2차원 자성 반데르발스 물질을 찾게 된다면 자기적 성질이라는 새로운 기능성 소재를 기존의 2차원 물질군에 넣음으로써 새로운 차원의 연구가 가능해진다. 2차원 반데르발스 물질은 이런 소재물리적인 접근 외에 강상관물질 연구에서도 중요한 의미를 가진다. 자기적 성질은 근본적으로 강한 쿨롱상호작용을 수반하게 된다. 이 점은 거의 모든 자기적 성질이 국소화된 전이금속 원소 d 전자에서 기인하고, 이런 d 전자는 강한 쿨롱상호작용을 가진다는 것을 생각해보면 쉽게 이해가 될 것이다. 또한 산업적으로 오래 전부터 반도체 산업의 집적기술 한계와 집적도 증가에 따른 발열문제 때문에, 실리콘을 대체할 신소재와 새로운 반도체 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그 대안 중 하나로 초고속, 초저전력 및 초고밀도 특성구현이 가능한 자성반도체가 제안되었다.

이러한 질문과 호기심에서 출발한 본 ‘자성반데르발스물질팀’은 2차원 자성 재료를 구현하고 자기물성과 물리적 성질 및 실험실 기반 기타 장비를 사용하여 포괄적인 물리적 특성을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 최근에는 이런 반데르발스 (van der Waals) 힘을 갖는 물질을 이용해 자성반도체의 핵심 소재인 자성 원자층 추출이 가능해졌다.^[16,17] 우리는 이를 통해

REFERENCES

- [7] J. Park *et al.*, Scientific Reports **6**, 25238 (2016).
- [8] S.-W. Cheong and M. Mostovoy, Nat. Mat. **6**, 13 (2007).
- [9] Y. S. Oh *et al.*, Nat. Mat. **14**, 407 (2015).
- [10] N. A. Benedek and C. J. Fennie, Phys. Rev. Lett. **106**, 107204 (2011).
- [11] K. S. Novoselov *et al.*, Science **306**, 666 (2004).
- [12] Y. Zhang *et al.*, Nature **438**, 201 (2005).
- [13] L. Tao *et al.*, Nature Nanotechnology **10**, 227 (2015).
- [14] L. Li *et al.*, Nature Nanotechnology **9**, 372 (2014).
- [15] H. H. Wang *et al.*, Nature Nanotechnology **7**, 699 (2012).
- [16] M.-W. Lin *et al.*, J. Mater. Chem. C **4**, 315 (2016).
- [17] X. Li *et al.*, J. Mater. Chem. C **2**, 7071 (2014).

Fig. 5. (a) Crystal structure of FePS_3 . Definitions of incident and scattered polarization angles are shown in the top view. (b) Temperature dependence of Raman spectrum of FePS_3 . (c) Temperature dependence of P1a peak height for different thicknesses.^[19]

2차원 자성현상에 대한 기초연구의 새로운 장이 열리고, 향후 이종접합 및 초격자 구조의 제작을 통한 스핀전자소자 응용연구의 전환점을 가져올 것으로 기대한다. 그림 4에서는 2차원 자성 반데르발스 물질을 이용하여 어떻게 새로운 연구를 할 수 있는지를 보여주고 있다.

‘자성반데르발스물질팀’은 지난 몇 년 동안 다양한 물질을 탐색하는 과정에서, 2차원 자성 반데르발스 물질을 찾아왔으며, 주로 화학증기수송반응법(Chemical Vapor Transport)을 이용하여 자성반도체의 핵심 소재인 자성 단위자층 물질을 제작하는데 최근 성공하였다.^[18] 이렇게 만들어진 단결정 시료를 박리과정을 통해 2차원 삼황화인니켈(NiPS_3),^[18] 삼황화인철(FePS_3)^[19] 그리고 삼황화인망간(MnPS_3)^[20] 단위자층을 추출할 수 있었다. 자성현상이라는 입장에서 흥미로운 점은 이들 물질이 임계현상의 대표적 모형계인 Ising, XY, Heisenberg 모델에 해당한다는 점이다. 즉, 자연스럽게 이들 물질을 이용하여 자성단위층에서 이들 자기적 상전이의 2차원 극한을 연구할 수 있게 되었다. 다만 현재 본 연구진이 판단하기에 자성 반데르발스 물질 연구에서 가장 큰 걸림돌은 기존의 자성측정 실험방법들이 2차원 자성반데르발스 물질 연구에 적용할 수 없다는 현실적인 문제이다. 이런 실험적인 문제점은 앞으로 이 분야가 발전하는데 반드시 해결되어야 하는 난제이고, 우리는 다양한 각도에서 이 문제를 해결하려고 노력하고 있다.

그림 5에 나와 있는 삼황화인철(FePS_3)은 철(Fe) 원소의 자기 구조가 반강자성체의 Ising 모델을 지니고 있다. 본 연구진은 서강대 정현식 교수 연구진과 공동연구를 통하여 라만 봉우리가 상전이 온도 이하에서 에너지가 변하는 것을 관측하고, 이 변화가 자기 상전이에 의한 존 폴딩(zone folding) 효과로부터 왔음을 알아냈다. 우리는 이 연구를 통하여 삼황화인철 다분자층에서 단분자층까지 자기 상전이가 동일하게 나타남을 확인하여 단분자층에서도 자기상전이가 존재한다는 증거 토대로 세계 최초로 2차원 Ising 모델의 상전이를 실험적으로 보고하

Fig. 6. (a) Schematic crystal structure. View perpendicular to layers with only top layer shown (upper schematic). The atoms contained in the section shaded grey are shown in view parallel to layers (lower schematic). (b) Tapping-mode AFM topography image of ultrathin NiPS_3 sheets. (c) Spectra of thin NiPS_3 sheets (2–7 layers) are shown.^[18]

Fig. 7 (a) Optical microscopic images of the mono-layers MnPS_3 . The scale bars at the bottom of the images are for $5 \mu\text{m}$. (b) Direct fitting (solid line) of the FNT model with the experimental I - V data. (c) Calculated barrier height from both linear fit and direct fit.^[20]

였다. 삼황화인니켈의 경우 155 K 이하에서 반강자성 정렬을 하는 물질로서 그림 6과 같이 상온 라만(Raman) 분광법 연구를 통해 단일층을 구현해도 자성이 유지되는 것을 확인했다.

삼황화인망간 물질에서는 원자력간 현미경(AFM)을 이용하여 산화주석(Tin Oxide)/삼황화인망간/백금(Pt) 소자를 형성하고, 그림 7과 같이 쇼트키접합(shottky)과 터널링(Fowler-Nordheim) 전류 모델을 기반으로 한 분석으로 다양한 물질과의 이종접합 응용에 기반을 마련했다. 이로서 본 연구진은 단일층 구조의 완벽한 2차원 자기구조를 실현하고 그에 대한 상전이를 정확히 관측하고 증명하였다. 또한 이는 단분자층이 될 수 있는 계층구조의 물질들이 저차원 자성 연구의 새로운 후보가 될 수 있다는 것을 보여주는 큰 의미를 가지고 있다. 지금까지 ‘자성 반데르발스물질팀’은 앞에서 언급한 세 가지 물질을 통해 반강자성 모형에 해당되는 모든 물질을 구현했으며, 이를 이용하여 다양한 2차원 자성현상에 대한 기초 연구를 수행하고 있다. 이외는 별도로 우리는 강자성(ferromagnetic) 반데르발스 물질 개발에 박차를 가하고 있다. 앞으로도 ‘자성반데르발스물질팀’

REFERENCES

- [18] C.-T. Kuo *et al.*, Scientific Reports **6**, 20904 (2016).
- [19] J.-U. Lee *et al.*, Nano Lett. **16**, 7433 (2016).
- [20] S. Lee *et al.*, APL Mater. **4**, 086108 (2016).

Fig. 8. Noncollinear ordered 120° spin structure of triangular lattice Heisenberg antiferromagnet.^[26]

은 이와 유사한 구조의 자성물질을 이용해 신소재를 확보하고 저차원 자성에 대해 더 깊은 이해를 바탕으로 스핀전자소자를 개발할 수 있을 것이라 기대하고 있다. 이 연구는 소자물리에 전문성을 가지고 있는 국내외 여러 그룹과 공동으로 진행하고 있다.

마그논-포논 결합 연구

물질을 이루고 있는 원자와 전자의 거동을 어떻게 볼 수 있을까? 실제로 다양한 응집 물질 시스템에서 나오는 수많은 역학적 특성을 직접 측정하고 특성화하는 방법은 무엇일까? ‘중성자산란팀’에서는 비탄성 중성자 및 X-선 산란 기술을 통해 이러한 궁금증에 해답을 제시하고 있다. 이 기술은 상호작용하거나 여기된 입자를 정확하게 구분하여 측정할 수 있으므로 자성 재료에서 나타나는 들뜬 입자를 예측하고 측정하는 연구를 가능하게 한다. 현재 우리가 가장 중점을 두고 있는 것은 응집물질 물리에서 두 개의 서로 다른 준입자 사이의 비선형 상호 작용을 관찰하고 정량화하는 것이다. 물리량으로는 마그논(magnons, spin wave를 양자화한 준입자)과 포논(phonons, 음향 양자)이 있다.^[21]

중성자 분광학은 강한 상호작용을 하는 양자물질의 거동을 측정하기 위한 가장 이상적인 실험방법이다. 이는 중성자가 Å(10^{-10}) 수준의 드브로이 파장과 여기된 준입자 에너지 대역과 잘 일치하는 수십에서 수백 meV 범위의 해당 에너지를 가지고 있기 때문이다. 중성자 산란 각도와 에너지를 조절함으로써 스핀 자화율과 같은 이론적으로 예상된 물리량을 실험결과와 비교 분석하는 것이 가능하다.

‘중성자산란팀’은 비탄성 중성자 및 X 선 산란 실험을 통해, 스핀과 격자의 자유도 사이의 상호 작용을 통제하는 미시적 메커니즘을 밝히기 위해 노력하고 있다. 마그논-포논 상호 작용을 관찰하기 위해서는 그림 8과 같이 스핀의 비공선적인 배열이 되어

Fig. 9. (Top) LuMnO₃ INS data of the spin wave spectrum taken with a time-of-flight spectrometer and (Bottom) linear spin wave theory calculations showing the individual modes (dotted lines) and the intensity of those modes (color) where magnon-phonon coupling has been taken into account so that the features in the red boxes match with the experimental data.^[24]

야만 하는데, 이 비공선적 배열의 조건은 다른 필수 성분과 함께 2차원 삼각 반강자성체(2D TLA)로 알려진 물질에서 발견된다. 이 물질은 현재 다중성(multiferroicity)^[22]에 기인한 독특한 자기적 성질로 인해 활발한 연구가 진행 중이며, 최근 ‘중성자산란팀’ 연구팀에서는 (Y,Lu)MnO₃,^[23,24] CuCrO₂^[25]와 같은 비공선형 반강자성 절연체의 스핀파에 대한 심층 연구를 수행하고 있다.

그동안 ‘중성자산란팀’은 마그논-마그논^[23]과 마그논-포논^[24] 결합 효과에 의해 스핀파가 어떻게 교란되는지 자세히 연구하고 있다. 이러한 상호 작용은 비행중성자분광계 장비를 이용한 비탄성 중성자 산란 측정으로 얻은 LuMnO₃의 스핀파 분산 결과(그림 9)에서 잘 나타난다. 예를 들면, 그림 9의 B점 $q=(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ 에서 나타나는 roton 최소점과 더 높은 에너지 전달에서 나타나는 넓은 에너지 폭(그림에서 빨간색 상자)에서 확인할 수 있다. 보다 구체적으로 실험과 이론^[26,27] 결과를 비교하면, (Y,Lu)MnO₃에서 하이브리드 자기 탄성 모드와 이를 생산하는데 필요한 압축교환 상호작용을 정량화해서 볼 수 있다. 본 연구가 발표된 이후, 스

REFERENCES

- [21] J. Jeong *et al.*, J. Korean Magn. Soc. **22**, 103 (2012).
- [22] S.-W. Cheong and M. Mostovoy, Nature Materials **6**, 13 (2007).
- [23] J. Oh *et al.*, J. Phys. Rev. Lett. **111**, 257202 (2013).
- [24] J. Oh *et al.*, J. Nat. Comm. **7**, 13146 (2016).
- [25] K. Park *et al.*, J. Phys. Rev. B **94**, 104421 (2016).
- [26] A. L. Chernyshev and M. E. Zhitomirsky, Phys. Rev. B **79**, 144416 (2009).
- [27] R. M. White *et al.*, J. Phys. Rev. **139**, A450 (1965).

Fig. 10. Theoretically calculated single magnon dispersion curve and dynamical structure factor $S(Q,E)$ using (a) the minimal Heisenberg Hamiltonian (dotted line) and (c) the full Hamiltonian (solid line) with magnon-phonon coupling (b) Contour plots of the INS intensity of CuCrO_2 . Adapted from [25].

위스 PSI 연구진은 LiCrO_2 에 대한 비탄성 X선 산란 측정 연구에서 본 연구진이 발견한 것과 매우 유사한 하이브리드 마그논-포논 모드의 존재를 입증했다.^[28] 우리는 또한 이상적인 2D TLAF CuCrO_2 에서 관찰된 스핀과 스펙트럼을 설명하기 위해 해밀토니언(Hamiltonian)에서 마그논-포논 결합 조건이 필요하다는 것을 보고했다.^[25] 그림 10과 같이 데이터를 모델링하기 위해서는 압축교환 상호작용과 관련된 조건이 필요한데, magnetoelastic 여기는 마그논 분산에서 최소값을 나타내며 에너지 레벨(level)의 반발로 인해 그림 10(c)와 같이 음향양자의 스펙트럼에서 최대값에 상응하게 된다.

또한 $(\text{Y,Lu})\text{MnO}_3$ 및 CuCrO_2 의 마그논 및 포논 분산을 설명하기 위해 사용된 마그논-포논 결합 개념은 비선형 자기 정렬을

갖는 다른 자성 재료에서 보다 일반적으로 적용될 수 있다. 앞으로 본 연구진은 고전적인 스핀을 가진 절연성 2D TLAF 물질을 뛰어 넘는 마그논-포논 혼성화로 인한 현상을 조금 더 체계적으로 예측하고 분석하는 것을 목표로 하고 있다. 예를 들면, 앞으로 양자스핀이나 비국소화 전자를 갖는 시스템, kagome, pyrochlore와 같은 다양한 격자 구조에서 자기 탄성 결합을 찾을 것이다. 이러한 미세한 물리적 변화를 실험적으로 밝히는 것이야말로 다양한 구조에서 나타나는 보편적인 특성을 결정함에 있어서 중요한 의미를 가진다.

맺음말

지난 수십 년에 걸친 연구를 통하여 강한상관물성 연구의 폭과 깊이는 다른 어떤 물리학 분야와 비교해도 뒤떨어지지 않을 정도로 넓고 깊어졌다. 이런 연구 분야에서 새로운 어떤 현상이나 물질을 발견한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 본 연구그룹은 자성반데르발스 물질이라는 독창적인 연구주제를 선정하고 이 연구 분야에서 새로운 연구를 개척해 가고 있다. 또한 루테튬 산화물을 비롯한 양자자성 산화물에서 새로운 물리현상을 발견하려 한다. 그리고 비탄성 중성자와 X선 산란을 통하여 마그논-포논 결합이라는 주제를 깊이 있게 연구하고 있다.

REFERENCES

- [28] S. Toth *et al.*, J. Nat. Comm. **7**, 13547 (2016).